

## برآورد دمای تبلور بلورهای کوارتز خود شکل منطقه قهرود کاشان با استفاده از دماسنج TitaniQ

محمدرضا رضایپور<sup>۱</sup>، محسن موذن<sup>۲\*</sup>، رباب حاجی علی اوغلی<sup>۱</sup>، وارطان سیمونز<sup>۲</sup>

۱- گروه علوم زمین، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز

۲- مرکز تحقیقات علوم پایه، دانشگاه تبریز

(دریافت مقاله: ۹۵/۱۰/۱، نسخه نهایی: ۹۶/۱/۲۳)

**چکیده:** توده نفوذی گرانیتوئیدی قهرود قسمتی از مجموعه آذرین ارومیه-دختر است و سنگ‌های اصلی تشکیل دهنده آن گرانیت و تونالیت با سن میوسن میانی هستند. فعالیت‌های گرمایی در پی نفوذ این توده آذرین، به ویژه در بخش جنوبی بسیار فعال بوده است. این امر موجب تشکیل کوارتزهای درشت خود شکل شده است. دگرسانی سنگ دیواره گرانیتوئیدی با تخریب فلدسپار پتاسیم، پلاژیوکلاز و بیوتیت همراه بوده و عناصر Sr, Rb, K و به مقدار کمتر Al را از داخل شبکه بلوری شسته و وارد سیال گرمایی کرده است. تجزیه نمونه‌های کوارتز با روش ذوب قلیایی و ICP-MS نشان دهنده افزایش مقادیر برخی از عناصر از جمله Li (۱۰/۳۳)، Al (۶۹۰۰ ppm)، K (۶۰۰ ppm)، و به ویژه دو عنصر Rb (۱/۲۵ ppm)، Sr (۳/۳۵ ppm) و بیهنجاری مثبت HREE نسبت به LREEها بیانگر گرمایی بودن کوارتزهای منطقه مورد نظر هستند. بکارگیری دماسنجی مقدار تیتانیوم در کوارتز یا TitaniQ دمای ۳۰۷ تا ۵۴۷ درجه سانتیگراد با مقدار متوسط ۳۷۱ درجه سانتیگراد (با توجه به تعداد داده‌ها) را برای تشکیل این کوارتزها نشان می‌دهد. این دما در همخوانی بسیار خوبی با دمای محاسبه شده با استفاده از سیالات درگیر (۳۰۶ تا ۵۵۰ درجه سانتیگراد) است. دماهای محاسبه شده خاستگاه گرمایی این کوارتزهای خود شکل را نشان می‌دهد.

**واژه‌های کلیدی:** کوارتز گرمایی، دماسنجی تیتانیوم در کوارتز، قهرود، کاشان.

### مقدمه

عناصر قلیایی و عناصر واسط هستند [۳-۵]. از عناصر فرعی موجود در کوارتز می‌توان برای تشخیص شرایط تبلور این کانی استفاده کرد [۶-۸]. تیتانیوم مهمترین عنصر در ساختار کوارتز است که مقدار انحلال آن (به صورت محلول جامد) در کوارتز تابع دماست [۵، ۹-۱۱]. از این امر برای کالیبره کردن دماسنج تیتانیوم در کوارتز و یا TitaniQ استفاده شده است [۱۱]. بر خلاف بیشتر کانی‌های گرمایی، کوارتز تحت تاثیر فرایندهای دگرسانی قرار نمی‌گیرد و بدین ترتیب می‌تواند شرایط تبلور را نشان دهد. از این نظر کوارتز کانی بسیار ارزشمندی است.

نفوذ توده گرانیتوئیدی قهرود در سنگ‌های رسوبی ژوراسیک و کرتاسه در منطقه کاشان تولید سامانه گرمایی را باعث شده است. بلورهای نسبتاً درشت خودشکل کوارتز بدین صورت شکل گرفته‌اند. دمای تبلور این کوارتزها با

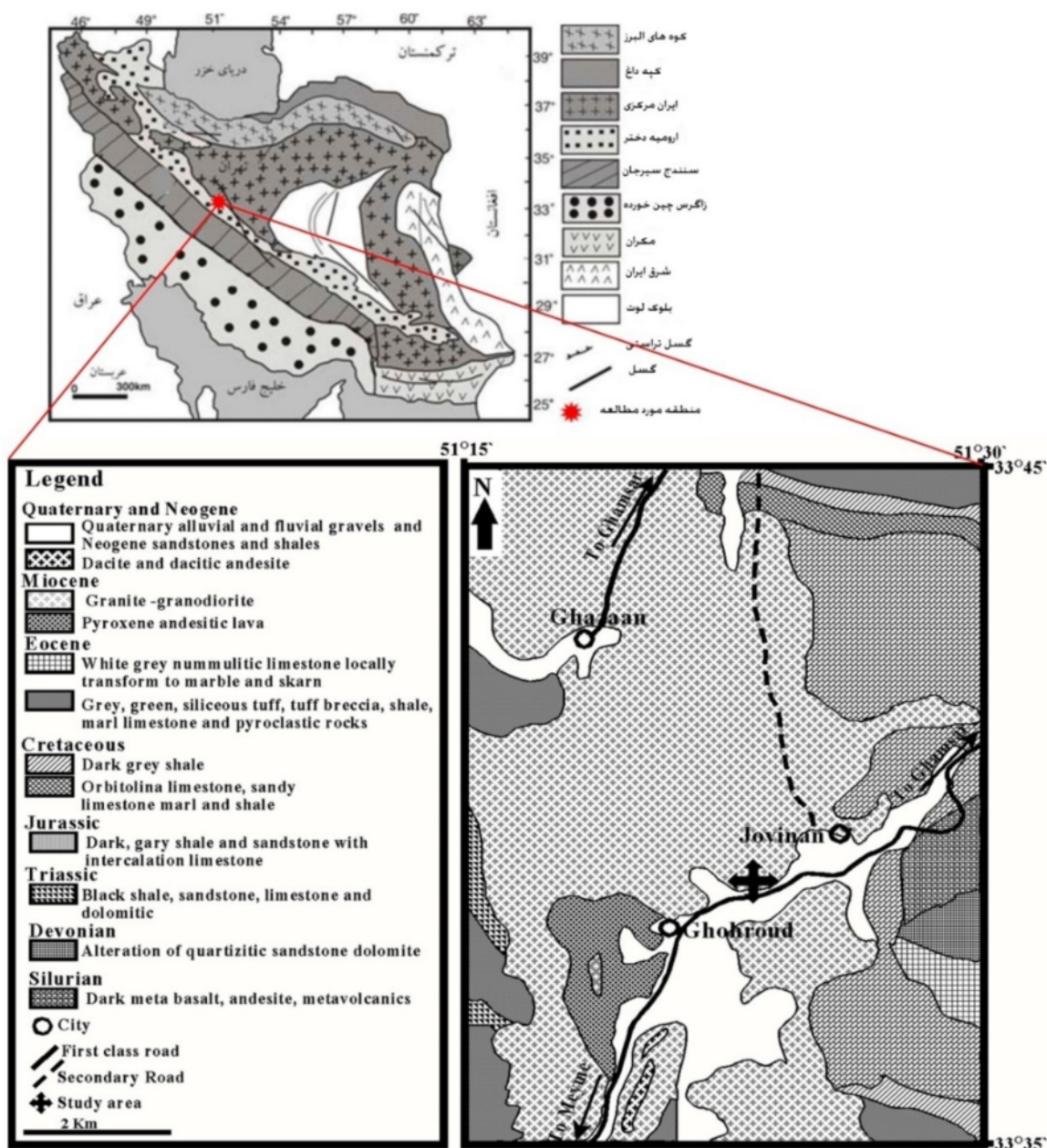
کوارتز یکی از عمده‌ترین کانی‌های تشکیل دهنده سنگ‌های مختلف در پوسته زمین است. این کانی از کانی‌های اصلی سنگ‌های آذرین حدواسط تا اسیدی، ماسه سنگ‌ها و سنگ‌های دگرگونی به ویژه سنگ‌های دگرگونی رسی و نیمه‌رسی است. همچنین کوارتز از محلول‌های گرمایی در سیستم‌های آذرین، دگرگونی و میانزایی تشکیل می‌شود [۱]. کوارتز در دمای ۵۰ تا ۷۵۰ درجه سانتیگراد از محلول‌های گرمایی تشکیل می‌گردد. بررسی کوارتزهای گرمایی اهمیت زیادی در شناخت شرایط تشکیل و چرخه سیالات گرمایی در پوسته زمین دارد [۲]. هر چند کوارتز به طور معمول SiO<sub>2</sub> خالص در نظر گرفته می‌شود لیکن می‌تواند عناصر دیگری را به صورت مقادیر جزئی در ساختار خود داشته باشد که مهمترین این عناصر آلومینیوم،

سن میوسن میانی در شمال و جنوب روستای قهرود در مجموعه‌ای از شیل و ماسه سنگ‌های ژوراسیک و سنگ آهک و مارن‌های کرتاسه و ائوسن نفوذ کرده و باعث دگرگونی مجاورتی سنگ‌های اطراف و تشکیل هورنفلس و اسکارن شده است (شکل ۱). فعالیت ژرف توده‌ای در منطقه قهرود به صورت توده نفوذی استوک مانند بوده و بیرونزدگی‌های بزرگ و کوچک این توده نزدیک به ۶۵ کیلومتر مربع مساحت دارد [۱۲]. عمده واحدهای سنگی منطقه به ترتیب سن عبارتند از سنگ‌های آذرآاری ائوسن، گرانیت و گرانودیوریت میوسن میانی، شیل-مارن و آهک الیگومیوسن و داسیت، تراکی آندزیت و آندزیت

استفاده از مقدار تیتانیوم آن‌ها محاسبه شده است. نتیجه این بررسی به همراه بررسی‌های ایزوتوپی و سیالات درگیر خاستگاه گرمایی را برای این کوارتزها مشخص می‌کند.

#### زمین شناسی منطقه

دسترسی به منطقه قهرود با مختصات جغرافیایی، طول ۵۶' تا ۵۱'۲۵' شرقی و عرض ۵۱' تا ۳۳'۴۱' شمالی از راه جاده آسفالت کاشان-قصر - میمه و سپس راه‌های خاکی منتهی به منطقه امکان‌پذیر است. توده گرانیتوئیدی قهرود در ۱۲۰ کیلومتری شمال غرب اصفهان در نوار ماگمایی ارومیه-دختر واقع شده است. این توده متشکل از گرانودیوریت-تونالیت با

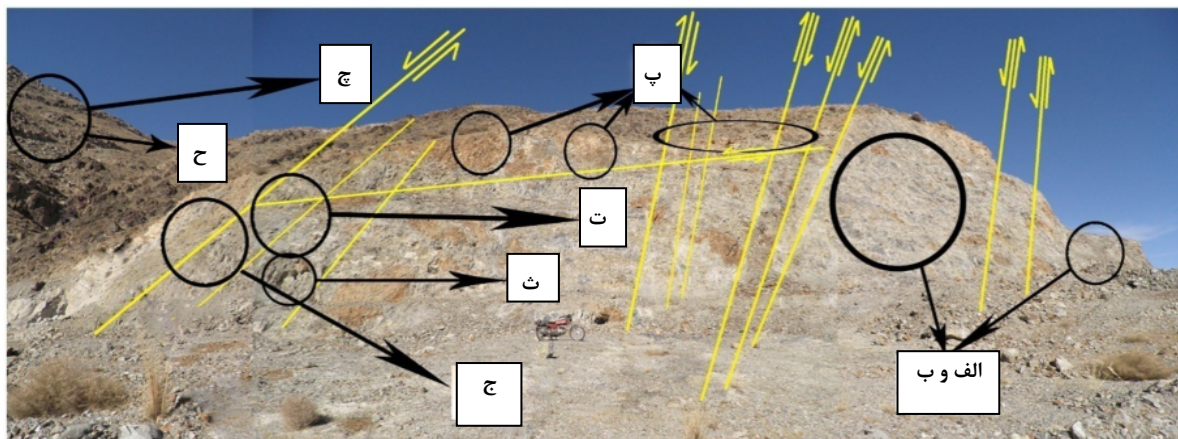


شکل ۱ نقشه ساده شده توزیع واحدهای سنگی منطقه مورد بررسی (برگرفته از نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ کاشان).

### توصیف کوارتزهای منطقه قهرود کاشان

فرایندهای گرمایی باعث تشکیل بلورهای کوارتز خود شکل در اندازه‌های بین ۱ تا ۱۴ سانتی‌متر در درز و شکاف‌های سنگ‌ها شده‌اند [۱۴]. درز و شکاف‌های ایجاد شده به همراه کوارتزهایی پس از آن، در همه سنگ‌های منطقه (گرانیت و گرانودیوریت، ماسه‌سنگ، اسکارن و هورنفلس) به جز دایک‌ها مشاهده شده و در همه سنگ‌شناسی‌های قدیمی‌تر از فعالیت گرمایی قابل شناسایی است [۱۵]. فرایندهای گرمایی و دگرسانی‌های پس از آن باعث ایجاد رنگ‌های متنوعی به صورت سطحی و حاشیه‌ای بلورهای کوارتز شده است. این رنگ‌ها به همراه فاصله و محل تشکیل آنها در شکل ۲ آورده شده است. شکل ۳ نمونه‌هایی از کوارتزهای تشکیل شده را نشان می‌دهد.

نوزا با ساختار گنبدی مانند. جنس قسمت جنوبی توده نفوذی از نوع گرانیت بوده و دگرسانی‌های متعددی بر آن اثر کرده‌اند. بررسی‌های سنگ‌نگاری و زمین‌شیمیایی انجام شده بر توده قهرود ضمن تأیید ترکیب گرانودیوریت و تونالیت برای آن، نشان دهنده نوع I بودن این توده و تشکیل آن از یک ماگمای آهکی-قلیایی و متآلومین در محیط زمین‌ساختی ماگمایی وابسته به قوس قاره‌ای است [۱۲]. همچنین بخش‌هایی از حاشیه جنوبی توده قهرود دچار دگرسانی‌های گرمایی وسیعی شده است. با توجه به شواهد سنگ‌نگاری، این دگرسانی‌ها از نوع سیلیسی‌شدن، سریشیتی‌شدن، کلریتی‌شدن، اپیدوتی‌شدن و هماتی‌شدن هستند [۱۳].



**شکل ۲** قرارگیری کوارتزها و آثار دگرسانی در سنگ‌های منطقه قهرود. (الف و ب) سنگ دربرگیرنده ماسه سنگ سیلیسی شده دارای کوارتزهای نیمه شفاف و شفاف، (پ) سنگ دربرگیرنده ماسه هماتی‌شدن دارای کوارتزهای با پوشش زرد رنگ، (ت) کوارتزهای با پایه‌های دودی-قهوه‌ای متمایل به قرمز، فاقد دگرسانی خاص (سنگ دربرگیرنده: گرانیت و گرانودیوریت)، (ث - ج) بدنه اپیدوتی و کلریتی شده، کوارتزهای با پوشش سطحی و حاشیه‌ای سیاه و سبز رنگ (سنگ دربرگیرنده: گرانیت و گرانودیوریت). (چ) کوارتزهای روتیل‌دار (سنگ دربرگیرنده: گرانیت، گرانودیوریت و اسکارن)، (ح) کوارتز گارنت‌دار (سنگ دربرگیرنده: اسکارن و گرانیت‌های آلاش یافته با پوسته). برای مقیاس شکل به موتورسیکلت توجه شود.

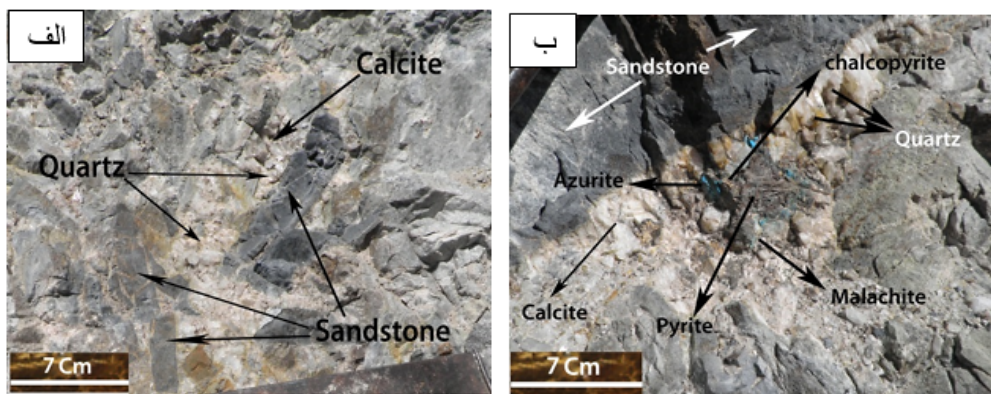


**شکل ۳** نمونه‌های دارای روتیل و بدون روتیل از کوارتزهای منطقه قهرود در کنار هم. برای تجزیه‌های شیمیایی از قسمت‌های بدون میانبار کوارتزهای روتیل‌دار استفاده شده است.

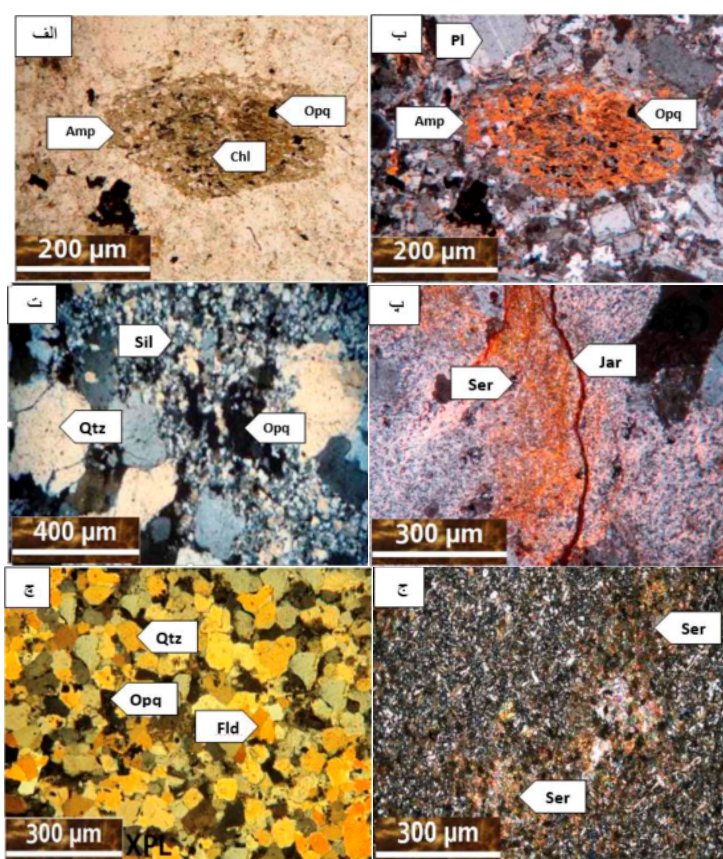


میکروسکوپیکی برگرفته از مرجع [۱۶] است. فرایند دگرسانی در این گرانیتوئیدها باعث تجزیه آمفیبول به کلریت، اپیدوت و کانی‌های تیره شده است. علاوه بر این شواهد، وجود بافت شکافه پرکن شاهد خوبی برای فرایند گرمایی اثرگذار بر توده است (شکل ۴).

بررسی‌های صحرایی و سنگ‌نگاری منطقه نشان‌دهنده فرایندهای گرمایی در این توده است (شکل ۴). مجموعه کانی-های حاصل از فعالیت‌های گرمایی و دگرسانی‌ها کوارتز، سریسیت، تورمالین، ژاروسیت، اکسیدهای آهن و کلریت هستند (شکل ۵). علائم اختصاری به کار رفته در تصاویر



شکل ۴ (الف) بافت شکافه پرکن که نشان‌دهنده فعالیت گرمایی است، (ب) علاوه بر بلورهای کوارتز کانی‌های دیگری از جمله کلسیت شکل‌دار، پیریت، کالکوپیریت، آزوریت و مالاکیت در شکاف‌های ماسه سنگ تشکیل شده‌اند.



شکل ۵ (الف) مقطع عرضی آمفیبول دگرسان شده به کلریت و کانی‌های تیره (نور PPL)، (ب) مقطع عرضی آمفیبول، رنگ متمایل به قهوه‌ای و قرمز بیانگر حضور تیتانیم و آهن در این کانی است که در نتیجه تأثیرات سیال گرمایی داغ کانی‌های تیره در راستای رخ کانی تشکیل شده‌اند (نور XPL)، (پ) دگرسانی سرسیتی و ژاروسیتی در توده نفوذی گرانیتوئیدی منطقه (نور XPL)، (ت) دگرسانی سیلیسی شدن، (ث) دگرسانی سرسیتی و سوسوریتی شدن در اثر آب‌های داغ گرمایی (نور XPL)، (ج) سنگ میزبان ماسه سنگی دربرگیرنده کوارتزهای شفاف و نیمه‌شفاف (نور XPL).

## روش آماده‌سازی و تجزیه نمونه‌ها

برای به دست آوردن نمونه‌های مناسب کوارتز برای تجزیه عناصر فرعی، نمونه‌های بسیار شفاف و فاقد درگیری‌های جامد و سیال انتخاب شدند. نمونه‌های انتخابی برای اطمینان از اینکه فاقد ادخال هستند، زیر میکروسکوپ مورد بررسی قرار گرفتند. سپس نمونه‌ها به وسیله پودرکن کربید تنگستن تا اندازه کوچکتر از ۲۰۰ مش (۷۵ میکرون) پودر شدند. به‌منظور آماده سازی نمونه‌ها برای تجزیه شیمیایی مقدار مشخصی از پودر نمونه تهیه شده با کمک ذوب لیتیوم بورات مخلوط شده و در ظروف پلاتینی روی شعله ذوب شدند (ذوب قلیایی). شیشه حاصل به وسیله مخلوط چهار اسید قوی (اسید هیدروکلریک، اسید نیتریک، اسید پیرکلریک و اسید هیدروفلوریک) حل شده و پس از به حجم رسانیدن به وسیله آب مقطر، توسط دستگاه طیف‌سنجی القایی پلاسمای جفتیده (ICP-MS) تجزیه شدند. تجزیه‌ها در شرکت Actlabs کانادا انجام شدند. تجزیه استانداردها به همراه نمونه‌ها نشان می‌دهد که دقت تجزیه برای عناصر فرعی در کوارتز حدود ۳ درصد است. نتایج تجزیه‌ها در جدول ۱ آمده است

## تعیین خاستگاه کوارتزهای قهرود با استفاده از بررسی عناصر کیمیا ب آنها

الگوی عناصر خاکی نادر برای کوارتزهای قهرود که بر اساس داده‌های مرجع [۱۷] نسبت به کندریت‌ها بهنجار شده است غنی‌شدگی مشخصی از HREE نسبت به LREE را نشان می‌دهد (شکل ۶).

طبق نظر [۶] این ویژگی به ترکیب مایعات اولیه‌ای بستگی دارد که غنی از Y و HREE بوده‌اند. کوارتزهای با غنی‌شدگی پگماتیتی مقدار LREE و سایر عناصر (برای مثال Al, Na, K, Li, Ti, Ge) بالایی دارند. توزیع این عناصر بیشتر در کانال‌ها و شبکه‌های ساختاری موازی با محور c کوارتز و یا در سیالات درگیر صورت می‌گیرد.

در بررسی‌های صورت گرفته توسط [۳] مشخص شده است که از الگوی نمودارهای عنکبوتی می‌توان به تشخیص دقیقی از کوارتزهای با خاستگاه گرمایی رسید. در صورتی که مقدار Al موجود در نمونه‌ها از ۳۰ ppm و تمرکز پتاسیم موجود از ۳۵ ppm بیشتر باشد، مقادیر Li, Rb, Sr و Y بالاتر از حد

معمول و همچنین غنی‌شدگی از HREE و فقیرشدگی از LREE صورت گرفته باشد می‌توان کوارتزها را جزء کوارتزهای گرمایی در نظر گرفت.

طبق نظر [۶] نمونه‌هایی با ویژگی‌های پگماتیتی متفاوت از نمونه‌های با خاستگاه گرمایی یا خاستگاه دگرگونی هستند و الگوی نزولی (غنی بودن از LREE و فقیر بودن از HREE) در نمودارهای عنکبوتی بهنجار شده نسبت به کندریت‌ها مشخصه کوارتزهای پگماتیتی و دگرگونی است. بر این اساس می‌توان نتیجه گرفت که نمونه‌های کوارتز قهرود بر اثر فعالیت‌های گرمایی به وجود آمده‌اند (جدول ۲).

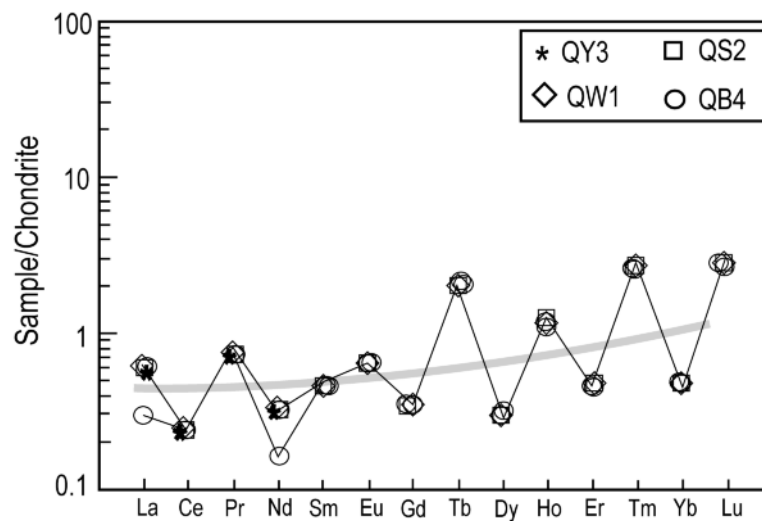
علاوه براین طبق نظر [۳] بی‌هنجاری Eu مشخصه کوارتزهای گرمایی و بی‌هنجاری Cs مشخصه کوارتزهای با خاستگاه دگرگونی و پگماتیتی هستند. کوارتزهای کاشان از نظر عنصر Eu نسبت به کوارتزهای دگرگونی غنی‌تر هستند (شکل ۷). پس می‌توان چنین گفت که خاستگاه کوارتزهای مورد بررسی از سیالات دگرگونی نیست. روابط صحرایی و انواع سنگ‌های موجود در منطقه نیز این مطلب را تأیید می‌کند. تفاوت در مقادیر عناصر Li, Al, K, Rb, Sr, Y برای کوارتزهای تشکیل شده از سیال‌های دگرگونی در منطقه Erzgebirge آلمان [۳] به همراه مقادیر میانگین همان عناصر برای کوارتزهای کاشان در جدول ۲ آورده شده است. به روشنی دیده می‌شود که خاستگاه کوارتزهای منطقه قهرود کاشان سیالات دگرگونی نیستند.

به عقیده [۳] افزایش مقدار عنصر استرانسیم در ترکیب کوارتزهای گرمایی می‌تواند به دلیل دگرسانی سنگ دیواره و خروج این عنصر از داخل پلاژیوکلازها باشد. این عنصر دارای شعاع و بار یونی بسیار نزدیک به عنصر کلسیم است و می‌تواند در شبکه فلدسپارها جانشین کلسیم شود. بدون شک دگرسانی سنگ دیواره گرانیتوئیدی با تخریب فلدسپار پتاسیم، پلاژیوکلاز و بیوتیت همراه بوده و قادر است عناصر Sr, Rb, K و همچنین به مقدار کمتر Al را از شبکه بلوری این کانی‌ها شسته و وارد سیال گرمایی کند. بنابر این کوارتزهای شکل گرفته از این سیالات گرمایی از این عناصر غنی هستند.

با توجه به بررسی‌های انجام شده توسط [۶] بر کوارتزهای حاصل از فعالیت‌های گرمایی، مقادیر بالای Sr و Rb گرمایی بودن کوارتزهای منطقه قهرود را تأیید می‌کند.

جدول ۱ مقدار عناصر فرعی در چهار نمونه از کوارتزهای منطقه قهرود.

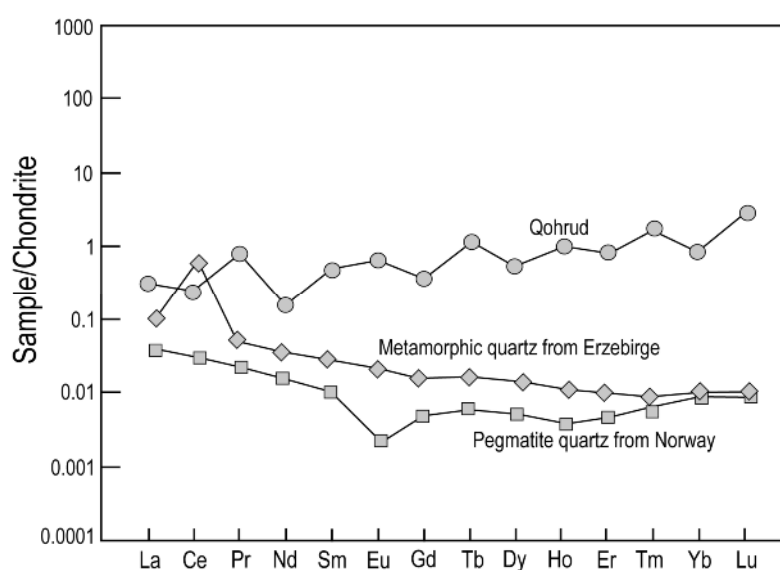
| Analyte | Unit | Detection | QW1    | QS2    | QY3    | QB4    |
|---------|------|-----------|--------|--------|--------|--------|
| Mn      | ppm  | ۱         | ۱۲۶    | ۱۱۲    | ۱۳۰    | ۱۷۸    |
| W       | ppm  | ۰/۱       | ۰/۱    | ۰/۳    | ۰/۱    | ۰/۱    |
| B       | ppm  | ۱         | ۱۲     | ۱۳     | ۱۱     | ۱۱     |
| Li      | ppm  | ۰/۵       | ۱۱     | ۸/۴    | ۹/۷    | ۱۲/۲   |
| Na      | %    | ۰/۰۱      | <۰/۰۱  | <۰/۰۱  | <۰/۰۱  | <۰/۰۱  |
| Mg      | %    | ۰/۰۱      | ۰/۰۵   | ۰/۰۵   | ۰/۰۵   | ۰/۰۵   |
| Al      | %    | ۰/۰۱      | ۰/۱۷   | ۰/۱۹   | ۰/۱۹   | ۰/۱۴   |
| K       | %    | ۰/۰۱      | ۰/۰۱   | ۰/۰۳   | ۰/۰۱   | ۰/۰۱   |
| Ca      | %    | ۰/۰۱      | ۰/۱۱   | ۰/۱۴   | ۰/۰۷   | ۰/۰۵   |
| Ti      | ppm  | ۰/۰۱      | ۱/۲۲   | ۱/۰۷   | ۱/۱۳   | ۱/۰۵   |
| Cd      | ppm  | ۰/۱       | <۰/۱   | <۰/۱   | <۰/۱   | <۰/۱   |
| V       | ppm  | ۱         | ۲      | ۳      | ۲      | ۲      |
| Cr      | ppm  | ۰/۵       | ۷/۴    | ۶/۲    | ۶/۸    | ۷/۵    |
| Fe      | %    | ۰/۰۱      | ۰/۲۶   | ۰/۲۴   | ۰/۲۴   | ۰/۲۸   |
| Hf      | ppm  | ۰/۱       | <۰/۱   | <۰/۱   | <۰/۱   | <۰/۱   |
| Ni      | ppm  | ۰/۵       | ۴      | ۲/۴    | ۴/۵    | ۷      |
| Er      | ppm  | ۰/۱       | <۰/۱   | <۰/۱   | <۰/۱   | <۰/۱   |
| Be      | ppm  | ۰/۱       | <۰/۱   | <۰/۱   | <۰/۱   | <۰/۱   |
| Ho      | ppm  | ۰/۱       | <۰/۱   | <۰/۱   | <۰/۱   | <۰/۱   |
| Hg      | ppb  | ۱۰        | <۱۰    | <۱۰    | <۱۰    | <۱۰    |
| Ag      | ppm  | ۰/۰۵      | ۰/۱    | ۰/۰۶   | ۰/۱    | ۰/۱    |
| Cs      | ppm  | ۰/۰۵      | ۰/۱۶   | ۰/۱۸   | ۰/۱۷   | ۰/۱۶   |
| Co      | ppm  | ۰/۱       | ۳      | ۲      | ۳      | ۳/۱    |
| Eu      | ppm  | ۰/۰۵      | <۰/۰۵  | <۰/۰۵  | <۰/۰۵  | <۰/۰۵  |
| Bi      | ppm  | ۰/۰۲      | ۱/۸۶   | ۰/۰۸   | ۱/۶۵   | ۲/۶۱   |
| Se      | ppm  | ۰/۱       | <۰/۱   | <۰/۱   | <۰/۱   | <۰/۱   |
| Ga      | ppm  | ۰/۲       | ۶/۳۷   | ۵/۱    | ۵/۲۸   | ۸/۳    |
| As      | ppm  | ۰/۱       | <۰/۱   | <۰/۱   | <۰/۱   | <۰/۱   |
| Rb      | ppm  | ۰/۲       | ۳      | ۲/۳    | ۳      | ۳      |
| Y       | ppm  | ۰/۱       | ۱/۲    | ۱/۷    | ۱/۵    | ۰/۶    |
| Zr      | ppm  | ۰/۱       | ۰/۲    | ۰/۲    | <۰/۱   | <۰/۱   |
| Nb      | ppm  | ۰/۱       | <۰/۱   | <۰/۱   | <۰/۱   | <۰/۱   |
| Mo      | ppm  | ۰/۱       | <۰/۱   | <۰/۱   | <۰/۱   | ۰/۲    |
| In      | ppm  | ۰/۱       | ۰/۳۱   | ۰/۳۱   | ۰/۳۱   | ۰/۳۱   |
| Sn      | ppm  | ۰/۱       | <۰/۱   | <۰/۱   | <۰/۱   | <۰/۱   |
| Sb      | ppm  | ۰/۱       | ۲      | ۴      | ۲      | ۲      |
| Te      | ppm  | ۰/۱       | ۰/۸    | ۰/۹    | ۰/۹    | ۱/۸    |
| Ba      | ppm  | ۰/۱       | <۰/۱   | <۰/۱   | <۰/۱   | <۰/۱   |
| La      | ppm  | ۰/۱       | ۱/۶    | ۱/۴    | ۱/۴    | ۱/۸    |
| Ce      | ppm  | ۰/۱       | ۰/۲    | ۰/۲    | ۰/۲    | <۰/۱   |
| Pr      | ppm  | ۰/۱       | ۰/۲    | ۰/۲    | ۰/۲    | ۰/۲    |
| Nd      | ppm  | ۰/۱       | <۰/۱   | <۰/۱   | <۰/۱   | <۰/۱   |
| Sm      | ppm  | ۰/۱       | ۰/۲    | ۰/۲    | ۰/۲    | <۰/۱   |
| Gd      | ppm  | ۰/۱       | <۰/۱   | <۰/۱   | <۰/۱   | <۰/۱   |
| Tb      | ppm  | ۰/۱       | <۰/۱   | <۰/۱   | <۰/۱   | <۰/۱   |
| Dy      | ppm  | ۰/۱       | <۰/۱   | <۰/۱   | <۰/۱   | <۰/۱   |
| Cu      | ppm  | ۰/۱       | <۰/۱   | <۰/۱   | <۰/۱   | <۰/۱   |
| Ge      | ppm  | ۰/۱       | ۴۱/۶۳  | ۳۹/۵   | ۴۰/۳۸  | ۴۳/۱   |
| Tm      | ppm  | ۰/۱       | <۰/۱   | <۰/۱   | <۰/۱   | <۰/۱   |
| Yb      | ppm  | ۰/۱       | <۰/۱   | <۰/۱   | <۰/۱   | <۰/۱   |
| Lu      | ppm  | ۰/۱       | <۰/۱   | <۰/۱   | <۰/۱   | <۰/۱   |
| Ta      | ppm  | ۰/۱       | <۰/۱   | <۰/۱   | <۰/۱   | <۰/۱   |
| Sr      | ppm  | ۰/۱       | <۰/۱   | <۰/۱   | <۰/۱   | <۰/۱   |
| Re      | ppm  | ۰/۰۰۱     | ۲/۷    | ۵/۲    | ۳/۶    | ۱/۹    |
| Tl      | ppm  | ۰/۰۰۱     | <۰/۰۰۱ | <۰/۰۰۱ | <۰/۰۰۱ | <۰/۰۰۱ |
| Pb      | ppm  | ۰/۰۵      | <۰/۰۵  | <۰/۰۵  | <۰/۰۵  | <۰/۰۵  |
| Th      | ppm  | ۰/۱       | ۴/۲۴   | ۷/۲    | ۲/۴۵   | ۲/۳    |
| U       | ppm  | ۰/۱       | ۰/۵    | ۰/۳    | ۰/۳    | ۰/۶    |
| Si      | %    | ۰/۰۱      | ۴۶/۴۲  | ۴۶/۴۳  | ۴۶/۴۱  | ۴۶/۴۱  |



شکل ۶ الگوی عناصر خاکی نادر بهنجار شده بر اساس داده‌های مرجع [۱۷] برای کوارتزهای قهرود (داده‌ها نسبت به کندریت بهنجار شده‌اند). هر چهار نوع کوارتز الگوی تقریباً مشابهی را نشان می‌دهند و بیانگر صعودی بودن نمودار و غنی شدگی از HREE نسبت به LREE هستند.

جدول ۲ تفاوت کوارتزهای گرمایی و کوارتزهای دگرگونی با توجه به عناصر کمیاب موجود در شبکه بلوری آنها.

| میانگین عناصر در کوارتزهای قهرود-کاشان | مشخصه کوارتزهای گرمایی در ذخایر قلع از نظر [۳] | کوارتزهای دگرگونی منطقه Erzgebirge در آلمان [۳] |
|----------------------------------------|------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| $Li = 10.33 \text{ (ppm)}$             | $Li \geq 0.9 \text{ (ppm)}$                    | $Li \leq 0.4 \text{ (ppm)}$                     |
| $Al = 6900 \text{ (ppm)}$              | $Al \geq 50 \text{ (ppm)}$                     | $Al \leq 30 \text{ (ppm)}$                      |
| $K = 600 \text{ (ppm)}$                | $K \geq 45 \text{ (ppm)}$                      | $K \leq 35 \text{ (ppm)}$                       |
| $Rb = 1.25 \text{ (ppm)}$              | $Rb \geq 250 \text{ (ppb)}$                    | $Rb \leq 50 \text{ (ppb)}$                      |
| $Sr = 3.35 \text{ (ppm)}$              | $Sr \geq 0.5 \text{ (ppm)}$                    | $Sr \leq 0.3 \text{ (ppm)}$                     |
| $Y = 1.5 \text{ (ppm)}$                | $Y \geq 40 \text{ (ppb)}$                      | $Y \leq 15 \text{ (ppb)}$                       |



شکل ۷ تفاوت کوارتزهای گرمایی قهرود کاشان و کوارتزهای دگرگونی (Erzgebirge) و کوارتزهای پگماتیته (نروژ)، با توجه به الگوی عناصر کمیاب بهنجار شده نسبت به کندریت‌ها.

### دماسنجی کوارتزهای منطقه با روش TitaniQ

مقدار تیتانیوم در کوارتزهای آذرین و دگرگونی قابل توجه است (۱ تا ۱۰۰ قسمت در میلیون). بنابراین با روشهای تجزیه ای مناسب می توان مقدار تیتانیوم در کوارتز را تعیین کرد. تیتانیوم چهار ظرفیتی در ساختار کوارتز به جای  $Si^{4+}$  در جایگاه چهار وجهی می نشیند [۱۸]. در سیستم های آذرین و دگرگونی که  $TiO_2$  به مقدار زیاد (فاز اضافی) به شکل کانی های تیتانیوم دار (بیشتر روتیل و تیتانیت) وجود دارد، Ti می تواند وارد ساختار کوارتز شود. مقدار ورود این عنصر به ساختار کوارتز تابع دماست [۱۱]. در سنگ های آذرین منطقه، کانی های تیتانیوم دار به صورت تیتانیت و در کوارتزها به صورت روتیل وجود دارند. برای کالیبره کردن دماسنج تیتانیوم در کوارتز که به دماسنج TitaniQ معروف است، [۱۱] از کوارتز مصنوعی در حضور روتیل استفاده کردند. آزمایش در دمای ۶۰۰ تا ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد و در فشار ۱ گیگا پاسکال انجام شد. این آزمایش نشان می دهد که مقدار Ti در کوارتز به طور اصولی با افزایش دما زیاد می شود. این وابستگی دمایی با معادله زیر بیان می شود.

$$\text{Log}(X_{Ti}^{Qtz}) = [(5.69 \pm 0.02) - (3765 \pm 24)] / T(^{\circ}K) \quad (۱)$$

استفاده از این دماسنج ساده است و تنها نیاز به تجزیه کوارتز در سنگ است. تجزیه را می توان با ریزپردازشگر (برای سنگ-هایی که در دمای بالاتر از ۶۰۰ درجه سانتیگراد تشکیل شده اند) و با پردازشگر یونی (برای سنگ هایی که در دمای پایین تا ۴۰۰ درجه سانتیگراد به وجود آمده اند) و یا برای کوارتزهای درشت که به سادگی قابل جدایش از سنگ هستند به روش ICP-MS انجام داد. این دماسنج بسیار دقیق است (خطای  $\pm 5$  درجه سانتیگراد) و قادر به تعیین تاریخچه دمایی سنگ هاست. هر چند این دماسنج برای سیستم های دارای روتیل (سیستم اشباع از  $TiO_2$  و در نتیجه فعالیت  $TiO_2$  برابر یک) کاربرد دارد، اما در صورتی که بتوان فعالیت  $TiO_2$  را به روشی تعیین کرد می توان آن را برای سیستم های فاقد روتیل نیز به کار برد [۱۱].

ترکیب شیمیایی کوارتزهای تجزیه شده منطقه قهرود در جدول ۱ دیده می شود. نوع عنصری که وارد ساختار کوارتز می شوند بستگی به شعاع کاتیونی و بار الکتریکی آنها دارد. تعداد کاتیون هایی که می توانند به جای  $Si^{4+}$  در ساختار کوارتز وارد شوند بسیار محدود است زیرا شعاع یونی سیلیسیم در مقایسه با سایر کاتیون های چهار ظرفیتی کوچکتر است [۴]. کاتیون هایی که جانشین سیلیسیم در ساختار کوارتز می شوند عبارتند از  $Al^{3+}$ ,  $Ti^{4+}$ ,  $Fe^{3+}$ ,  $Ge^{4+}$ ,  $P^{5+}$ ,  $Ga^{3+}$  [۱۸-۲۰].

کانال های نسبتاً بزرگ در ساختار کوارتز به موازات محور بلوری c وجود دارند. کاتیون های بزرگتر مانند  $H^+$ ,  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $Li^+$ ,  $Fe^{2+}$ ,  $Cu^+$ ,  $Co^{2+}$ ,  $Ag^+$  می توانند در این کانال ها جایگیری کرده و هنگام جانشین شدن کاتیون های سه و پنج ظرفیتی به جای سیلیسیم چار ظرفیتی، تعادل بار الکتریکی در بلور را حفظ کنند [۱۹، ۲۰].

مقدار Ti در کوارتزهای بررسی شده ۱/۰۵ تا ۱/۲۲ قسمت در میلیون است. سایر عناصر قابل توجه در ساختار کوارتزهای قهرود عبارتند از منگنز به مقدار ۱۱۲ تا ۱۷۸ قسمت در میلیون، لیتیوم به مقدار ۸/۴ تا ۱۲/۲ قسمت در میلیون و ژرمانیوم که حدود ۴۰ قسمت در میلیون از ترکیب کوارتز را به خود اختصاص داده است.

از آنجا که روتیل به صورت اذخال در کوارتزهای منطقه دیده می شود می توان نتیجه گرفت که سیستم گرمایی اشباع از  $TiO_2$  بوده است. بدین ترتیب می توان از دماسنج TitaniQ برای کوارتزهای منطقه قهرود استفاده کرد. میانگین دمای دست آمده توسط معادله مرجع [۱۱] برابر با ۳۷۱ درجه سانتیگراد است. این دما با دمای محیط گرمایی و همچنین دمای محاسبه شده از سیلات درگیر (۳۰۶ تا ۵۵۰ درجه سانتیگراد) در کوارتز همخوانی دارد [۲۱].

### برداشت

نفوذ توده گرانیوتوئیدی قهرود در سنگ های رسوبی ژوراسیک و کرتاسه سیستم دگرسانی گرمایی گسترده ای را به ویژه در قسمت جنوبی ایجاد کرده است. کوارتزهای خود شکل درشت



quartz", Contributions to Mineralogy and Petrology, (2010) 010-0505-3.

[6] Götze J., Plotze M., Graupner T., Hallbauer D. K., Colin J. B., "Trace element incorporation into quartz: A combined study by ICP-MS, electron spin resonance, cathodoluminescence, capillary ion analysis, and gas chromatography", Geochimica et Cosmochimica Acta, V. 68, (2004) 3741-3759.

[7] Landtwing M., Pettke T., "Relationships between SEM-cathodoluminescence response and trace element composition of hydrothermal vein quartz", American Mineralogist, V. 90, (2005) 122-131.

[8] Peppard B. T., Steele I. M., Davis A. M., Wallace P. J., Anderson A.T., "Zoned quartz phenocrysts from the rhyolitic Bishop Tuff", American Mineralogist, V. 86, (2001) 1034-1052.

[9] Storm L. C., Spear F. S., "Application of the titanium in- quartz thermometer to pelitic migmatites from the Adirondack Highlands, New York", Journal of Metamorphic Geology, V. 27, (2009) 479-494.

[10] Hayden L. A., Watson E. B., Wark D. A., "Rutile saturation in hydrous siliceous melts and its bearing on Ti-thermometry of quartz and zircon", Earth and Planetary Science Letters V. 258, (2007) 561-568.

[11] Wark D.A., Watson B.E., "TitaniQ: A titanium in quartz geothermometer", Contributions to Mineralogy and Petrology, V. 152, (2006) 743-754.

[۱۲] بدر ا.، طباطبائی منش م.، مکی زاده م.، هاشمی م.، تقی پور ب.، "مطالعه کانی شناسی و ژئوشیمی توده نفوذی قهرود" پترولوژی ۱۵(۴)، (۱۳۹۲) ۹۷-۱۰۴.

[۱۳] شرافت ش.، محمدی نسب ع.، مکی زاده م ع.، خدای م.، "پیدایش ژاروسیت در گرانودیوریت‌های دگرسان قهرود" دانشگاه آزاد واحد زاهدان، ۳(۲)، (۱۳۸۵) ۹۶-۱۰۱.

[۱۴] رضایور م ر.، قره چاهی ز.، اسلامی ع ر.، مودن م.، "معرفی و نحوه تشکیل شش نوع کوارتز هگزگونال در منطقه قهرود- کاشان، استان اصفهان". اولین همایش مجازی علوم زمین، دانشگاه ارومیه (۱۳۹۲).

در اثر فعالیت‌های گرمایی در سنگ‌ها و بیشتر به شکل پر کننده شکاف‌ها تشکیل شده‌اند. عناصر فرعی در این کوارتزها تجزیه شیمیایی شدند. مقدار این عناصر نشان دهنده خاستگاه گرمایی برای کوارتزهاست. از مقدار تیتانیوم موجود در کوارتز برای تعیین دمای تشکیل آن استفاده شد. این دما حدود ۳۷۱ درجه سانتیگراد است. دمای به دست آمده با سامانه گرمایی سازگار است. دمای محاسبه شده با استفاده از سیالات درگیر در بررسی دماهای به دست آمده از داماسنجی تیتانیوم در کوارتز یا TitaniQ را تأیید می‌نماید.

### قدردانی

این پژوهش با حمایت مدیریت تحصیلات تکمیلی دانشگاه تبریز صورت گرفته است. از خانم زهرا قره‌چاهی برای کمک- هایشان تشکر می‌کنیم. از سردبیر محترم مجله و داوران محترم که با نظرات سازنده موجب بهتر شدن مقاله شدند سپاسگزاریم.

### مراجع

[1] Rusk B. G., Lowers H. A., Reed M.H., "Trace elements in hydrothermal quartz: Relationships to cathodoluminescent textures and insights into vein formation", Geology, V. 36, (2008) 547-550.

[2] Allan M.M., Yardley, B.W.D., "Tracking meteoric water infiltration into a magmatic hydrothermal system: A cathodoluminescence, oxygen isotope, and trace element study of quartz from Mt. Leyshon, Australia" Chemical Geology, V. 240, (2007) 343-360.

[3] Monecke T., Kempe U., Götze. J., "Genetic significance of the trace element content in metamorphic and hydrothermal quartz: a reconnaissance study", Earth and Planetary Science Letters, V. 202, (2002) 709 - 724.

[4] Muller A., Seltmann R., Behr H. J., "Application of cathodeluminescence to magmatic quartz in a tin granite case study from the Schellerhau granite complex, eastern Erzgebirge, Germany", Mineralium Deposita, V. 35, (2000) 169-189.

[5] Thomas B., Watson B., Spear S., Philip T., Saroj K., "TitaniQ under pressure: the effect of pressure and temperature on the solubility of Ti in

- [18] Maschmeyer D., Lehmann G., "New hole centres in natural quartz." *Physics and Chemistry of Minerals*, V.10, (1983) 84-88.
- [19] Lehmann G., Bambauer H.V., "Quarzkristalle und ihre Farben". *Angewacht für Chemie*, V, 7 (1973) 281-289.
- [20] Weil J. A., "A review of electron spin spectroscopy and its application to the study of paramagnetic defects in crystalline quartz", *Physics and Chemistry of Minerals*, V. 10, (1984) 149-165.
- [۲۱] رضاپور م. ر.، "مطالعه بلورهای شکل دارکوارتز منطقه کاشان"، پایان نامه کارشناسی ارشد دانشگاه تبریز (۱۳۹۳).
- [۱۵] رضاپور م. ر.، مودن م.، قره چاهی ز.، سیمونز و.، حاج علی اوغلی ر.، "معرفی و توصیف خصوصیات فیزیکی کوارتز همگناگونال حاوی بلورهای گارنت در منطقه قهرود-کاشان، استان اصفهان" اولین همایش ملی زمین شناسی و اکتشافات معدنی، دانشگاه شهید باهنر کرمان (۱۳۹۳).
- [16] Kretz R., "Symbols for rock – forming minerals", *American Mineralogist*, V. 68, (1983) 277 – 279.
- [17] Sun S. S., McDonough W. F., "Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes, In: Saunders, A.D., Norry, M.J. Eds., *Magmatism in Ocean Basins*", Geological Society Special Publication, London, (1989) 313–345.